

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.896:621.865

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ РОБОТОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

*Статья поступила в редакцию 10.07.2019, в окончательном варианте – 25.08.2019.*

**Ястребова Ирина Владимировна**, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2 Бауманская, 5, магистрант, e-mail: iyast37@gmail.com

**Воротников Сергей Анатольевич**, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2 Бауманская, 5, кандидат технических наук, e-mail: vorotn@bmstu.ru

**Калиниченко Сергей Владимирович**, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2 Бауманская, д. 5, кандидат технических наук, e-mail: kln-sv777@yandex.ru

Статья посвящена разработке системы управления шагающим роботом вертикального перемещения. Описана кинематическая схема шагающего робота вертикального перемещения и представлена его математическая модель. Предложен алгоритм управления автономным перемещением шагающего робота вертикального перемещения (в частично недетерминированной среде на основе принципов нечеткой логики). Разработана модель движения робота в среде «MATLAB Simulink» с использованием инструмента «Fuzzy Logic Toolbox». Проведено компьютерное моделирование движения робота по вертикальным поверхностям и поверхностям, расположенным под произвольным углом друг к другу, с использованием алгоритмов сетей Петри. Приведены результаты моделирования, выполнен их содержательный анализ.

**Ключевые слова:** мобильный робот, обследование стен, дефектоскопия, кинематическая модель, нечеткая логика, алгоритм Мамдани, полуавтоматический режим, математическое моделирование, шагающий робот, вакуумный захват, вертикальное перемещение

### CONTROL SYSTEM OF THE WALKING WALL CLIMBING ROBOT

*The article was received by the editorial board on 10.07.2019, in the final version – 25.08.2019.*

**Iastrebova Irina V.**, Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, undergraduate student, e-mail: iyast37@gmail.com

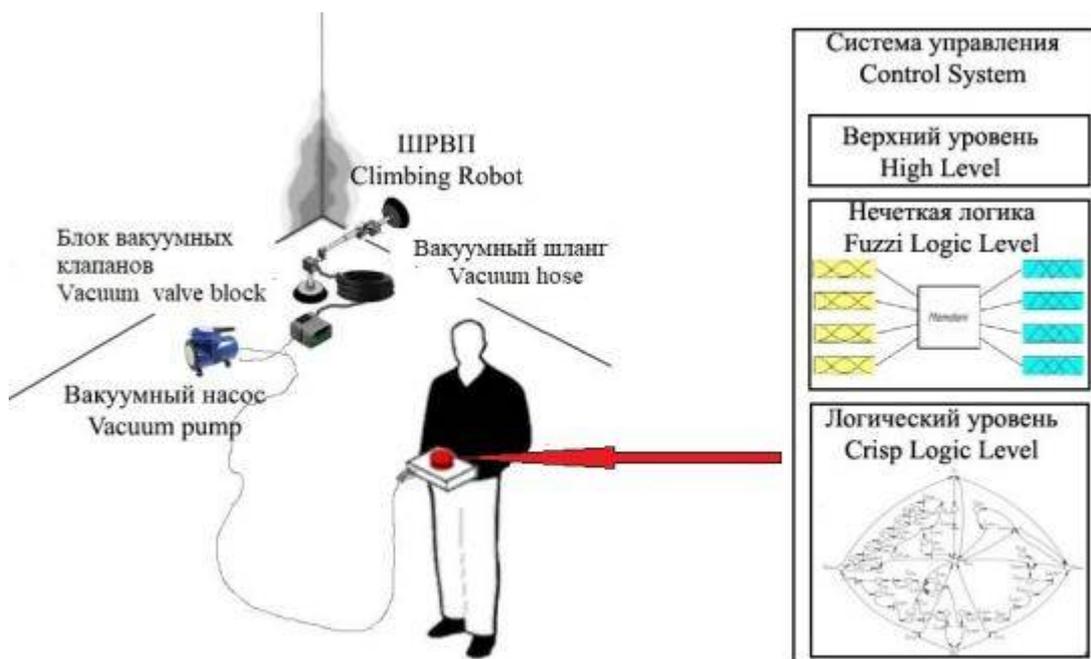
**Vorotnikov Sergey A.**, Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), e-mail: vorotn@bmstu.ru

**Kalinichenko Sergey V.**, Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), e-mail: kln-sv777@yandex.ru

The article is devoted to the development of a control system of a vertical-movement robot (Wall Climbing Robot). The kinematic scheme of Wall Climbing Robot is described and its mathematical model is presented. An algorithm for autonomous movement of Wall Climbing Robot in a partially non-deterministic environment based on the principles of fuzzy logic is proposed. A model of robot movement in the MATLAB Simulink program using the Fuzzy Logic Toolbox has been developed. A computer simulation of the robot movement on surfaces located at an angle to each other, using Petri nets algorithms, has been carried out. The results of the simulation are presented, their informative analysis is performed.

**Keywords:** mobile robot, wall flaw detection, kinematic model, fuzzy logic, Mamdani algorithm, semi-automatic mode, mathematical simulation, climbing robot, vacuum gripper, vertical movement

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** В настоящее время роботы вертикального перемещения (англ. *Wall Climbing Robots* – дословно «роботы, карабкающиеся по стенам») составляют отдельный класс робототехнических систем. Они предназначены для выполнения различных технологических операций на вертикальных и наклонных поверхностях зданий и сооружений, корпусов кораблей, резервуаров и т.п., включая их осмотр и проведение некоторых ремонтных операций. В литературе [4, 13, 15] описаны различные кинематические схемы таких роботов и разные способы их удержания на поверхностях. На сегодняшний день кинематические схемы таких роботов чаще всего представляют собой шагающие механизмы, а для закрепления на поверхности обычно применяют различные типы управляемых вакуумных захватов [8]. Перемещение по стенам здания осуществляется подачей соответствующих синхронизированных управляющих сигналов на конечности и вакуумные захваты транспортного модуля робота.

Заметим, что в большинстве случаев управление таким роботом, имеющим комплексную сенсорную систему [3], осуществляется дистанционно, в ручном режиме с помощью пульта оператора [2]. На него поступает телеметрическая информация о состоянии узлов управляемой системы и окружающей среды. Такое управление требует от оператора высокой квалификации, так как даже небольшая его ошибка может привести к падению робота и его выходу из строя. Поэтому при выполнении производственных задач, например, дефектоскопии стен [9], робот обычно снабжается страховкой в виде троса, спущенного с крыши здания.

В данной статье рассмотрено построение комплекса аппаратно-программных средств, позволяющих *шагающему роботу вертикального перемещения* (ШРВП) двигаться по произвольно ориентированным плоским поверхностям с заранее неизвестными фрикционными свойствами в автономном режиме. В формальной постановке ШРВП такого типа можно считать адаптивным, а окружающую среду – частично недетерминированной. Предполагаемой задачей для такого робота считаем осмотр внутренних стен зданий (т.е. работу в режиме «in-door») с помощью телевизионных камер на борту. Поскольку рассматриваются задачи перемещения внутри помещений, то в данной статье не будут учитываться ветровые и прочие динамические воздействия на робота.

**Кинематическая схема ШРВП.** Рассмотрим конструкцию двухопорного ШРВП с вакуумными захватами в каждой из опор, перемещающегося по сопряженным произвольно ориентированным плоским поверхностям с неизвестными коэффициентами трения (рис. 1а). Носимое (навесное) оборудование, в число которого входит дефектоскоп, телевизионная камера и т.п., здесь и далее не рассматривается. На рис. 1б приведена конструктивная схема макета такого ШРВП, разработанного в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

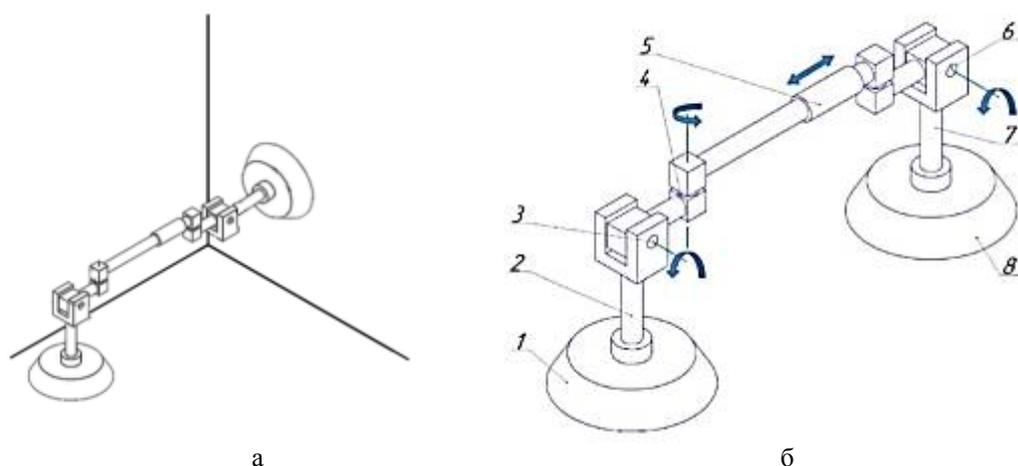


Рисунок 1 – Макет двухопорного ШРВП: а – принцип перехода на сопряженную поверхность; б – конструктивная схема

Рассматриваемый ШРВП имеет две опоры (левую и правую), выполненные в виде стоек (2, 7) с вакуумными захватами (1, 8); содержит по одному приводу вращения (3, 6) каждой опоры и один привод линейного перемещения (5), расположенный между ними. Также для изменения направления движения ШРВП снабжен шарниром (4), ось вращения которого лежит в плоскости, перпендикулярной плоскостям осей вращения шарниров (3 и 6).

Отметим, что такое количество опор (две) является минимальным, при котором обеспечивается необходимая маневренность ШРВП, позволяющая ему обойти всю площадь исследуемой поверхности.

Для разработки системы управления предложенной конструкцией необходимо составить кинематическую схему ШРВП и построить систему координат с параметрами Денавита – Хартенберга. Такой подход позволяет провести расчет прямой и обратной задач кинематики [1]. При этом введем два допущения. Во-первых, учтем, что при движении принципиально важно позиционировать опоры параллельно поверхности перемещения. Поэтому ограничимся построением кинематического управления по положению. Во-вторых, ограничимся плоской кинематической схемой ШРВП (рис. 2), допускающей шагание «прямо» и переход со стены на стену. Для этих режимов привод поворота (4) «замораживается».

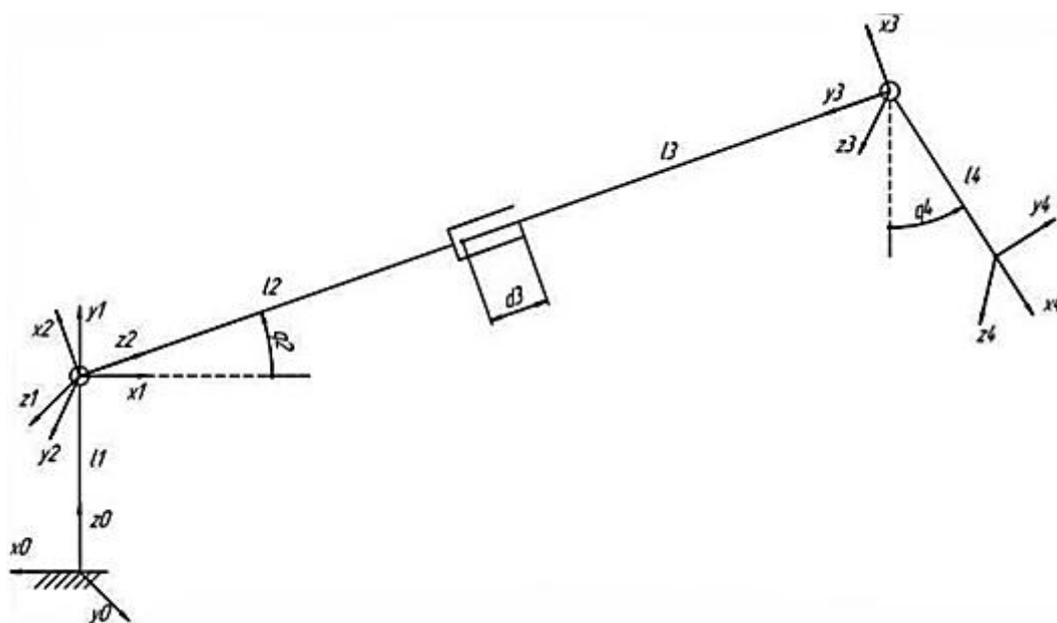


Рисунок 2 – Кинематическая схема ШРВП

Примечание. Пропорции схемы соответствуют размерам макета, где  $l1 = l4 = 0,085$  м,  $l2 = l3 = 0,185$  м.

Тогда параметры Денавита – Хартенберга [5] можно представить в виде таблицы.

Таблица – Параметры Денавита – Хартенберга

|   | $Q$        | $A$      | $A$  | $D$     |
|---|------------|----------|------|---------|
| 1 | $\Pi$      | $\pi/2$  | 0    | $l1$    |
| 2 | $\pi/2+q2$ | $\pi/2$  | 0    | 0       |
| 3 | 0          | $-\pi/2$ | 0    | $l2+d3$ |
| 4 | $-\pi+q4$  | 0        | $l4$ | 0       |

Решение прямой задачи кинематики о положении для данной схемы выглядит следующим образом:

$$x = -0,085sq_2cq_4 - 0,085cq_2sq_4 - (0,185 + d_3)cq_2;$$

$$y = 0;$$

$$z = -0,085cq_2cq_4 + 0,085sq_2sq_4 + (0,185 + d_3)sq_2,$$

где  $cq_i = \cos(q_i)$ ;  $sq_i = \sin(q_i)$ ;  $x = x_4$ ;  $y = y_4$ ;  $z = z_4$ ;  $q_2, d_3, q_4$  – обобщенные координаты.

Приведем решение обратной задачи о положении:

$$q_2 = \frac{\sqrt{23,5z - 138,4z^2}}{0,23 - 0,085x - 0,46\sqrt{23,5z - z^2}};$$

$$d_3 = -x - 0,185 - 0,085\sqrt{23,5z - z^2};$$

$$q_4 = \arccos\left(1 - \frac{z}{0,085}\right).$$

Данные выражения позволяют найти положение опор ШРВП в любой момент времени и при известной длине опоры определить максимально допустимые размеры препятствий движению ШРВП по стене. В кинематической схеме максимальное значение шага робота выбрано равным 250 мм, что с учётом длин его звеньев позволит преодолевать препятствия (выступы и разрывы поверхности) размером до 450 мм.

**Структура системы управления ШРВП.** Система управления ШРВП представлена в виде схемы, показанной на рисунке 3.

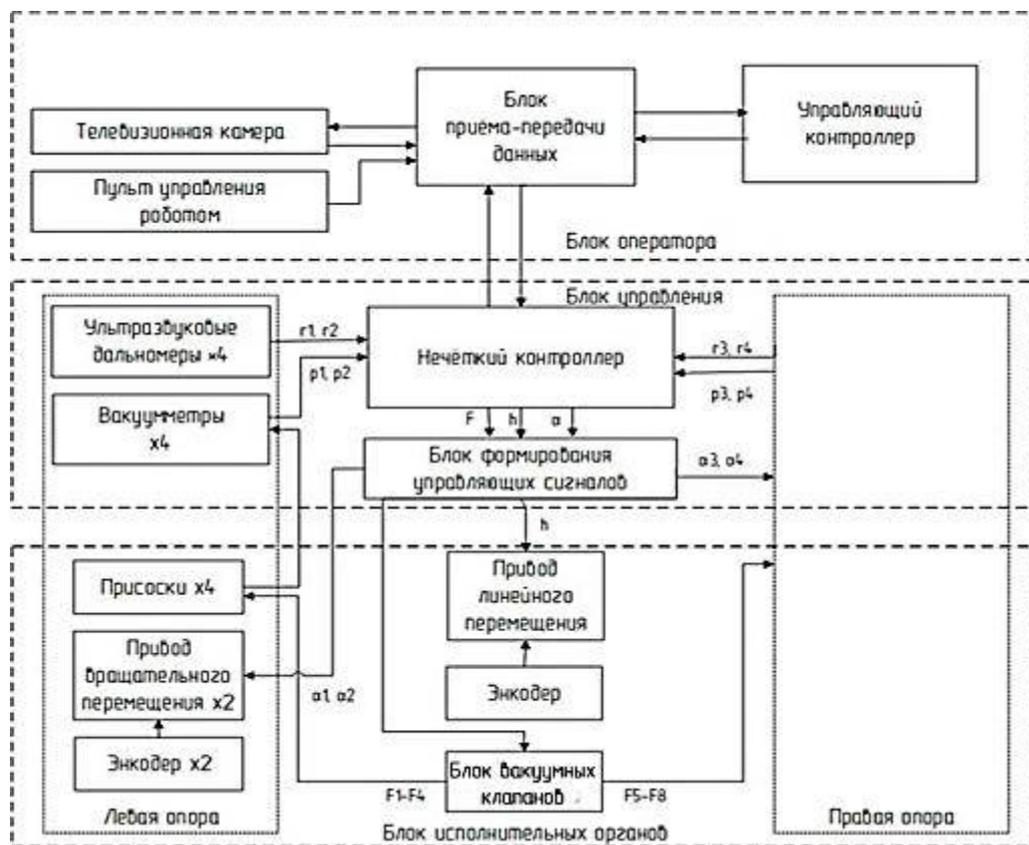


Рисунок 3 – Структура системы управления ШРВП

На схеме приведены основные элементы системы управления роботом в виде блоков, взаимодействующих между собой и имеющих следующие функции: блок оператора, блок управления, блок исполнительных органов.

*Блок оператора* обеспечивает удаленное управление роботом с помощью пульта управления, в состав которого входит основной управляющий контроллер. На этот блок поступают данные телеметрии от телевизионной камеры.

*Блок управления* расположен на роботе; он получает команды оператора и формирует сигналы управления на блок исполнительных устройств. Контроллер управляющих сигналов, представляющий собой нечеткий контроллер, анализирует данные от датчиков вакуумметрического давления (вакуумметров) и ультразвуковых дальномеров, определяя тем самым надежность зацепления и дальность до препятствий. Учитывая, что разрежение в каждой опоре ШРВП индивидуально и зависит от свойств контактной поверхности, при построении контроллера использовались принципы нечеткой логики [10]. Входными переменными являются текущее разрежение в опоре  $p$  и дальность до препятствия  $r$ , а выходными – необходимая сила прижатия опоры  $F$ , шаг привода линейного перемещения  $h$  и угол поворота  $\alpha$  привода горизонтального вращения опоры робота.

*Блок исполнительных органов* включает в себя следующие приводы, обеспечивающие вращательное и линейное движение опор робота, вакуумный насос и блок вакуумных клапанов, регулирующий разрежение в соответствующей опоре. Это устройство построено по схеме «1 вход – 8 выходов»; вход подключен к вакуумному насосу, выходы – к соответствующим присоскам. Уровень разрежения в каждой присоске регулируется с помощью пропорционального клапана.

Собственно *вакуумное захватное устройство* ШРВП является частью блока исполнительных органов. Оно представляет собой две группы независимых присосок, по четыре на каждую опору, установленных на ее внутренней поверхности (подошве) с угловым шагом  $90^\circ$  (поз. 2 на рис. 4а). Вакуумный насос и блок вакуумных клапанов размещены в зоне расположения оператора на поверхности земли.

*Дальномеры*, в качестве которых используются ультразвуковые датчики *Microsonic nano-15/CI* (рис. 4б) [7], также размещены вдоль обода опоры, но ориентированы по осям  $X$  и  $Y$  соответственно и соединены попарно (поз. 1 на рис. 4а). Такое расположение датчиков позволяет отслеживать параллельность плоскости опоры к рабочей поверхности.

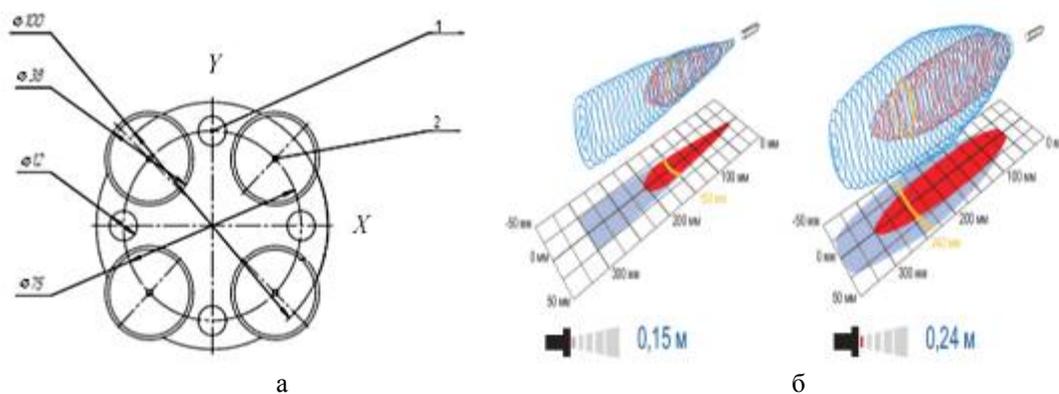


Рисунок 4 – а – схема расположения дальномеров (1) и присосок (2) на внутренней стороне (подошве) опоры ШРВП; б – диаграммы направленности дальномера для двух режимов

Выбор комплектующих вакуумного захватного устройства определялся массогабаритными параметрами ШРВП и, как следствие, значением необходимого разрежения в присосках каждой опоры. Исходя из этих расчетов, в опорах применены малогабаритные круглые флюорокаучуковые присоски Schmalz PFYN 35 FPM-65 G1/8-AG с допустимой силой прижатия 44 Н [14].

В качестве примера рассчитаем среднее значение силы прижатия, а также разрежение в присоске, необходимое для прикрепления опоры ШРВП к вертикальной плоскости.

1. Сила прижатия  $F$ , действующая на одну из четырех присосок, должна быть больше сил, воздействующих на опору с присосками: силы тяжести, трения и инерции. Назовем эти силы силами отрыва присоски  $F_{отр}$ . Для оценочных расчетов можно использовать следующее выражение:

$$F_{\text{отр}} = \frac{mgSK}{4\mu} = 93,75 \text{ Н},$$

где  $m = 5$  кг – желаемая масса робота с полезной нагрузкой;  $g$  – ускорение свободного падения;  $S = 1,5$  – коэффициент безопасности;  $\mu = 0,3$  – коэффициент трения по относительно шероховатой поверхности;  $K = 1,5$  – коэффициент запаса, учитывающий силы инерции и падение давления в шлангах, соединяющих присоски в опорах корпуса робота с вакуумным насосом.

2. Для выбранной присоски сила прижатия в соответствии с паспортными данными и с учетом коэффициента безопасности равна:

$$F_{\text{пасп}} = F_{\text{п}}S = 44 \cdot 1,5 = 66 \text{ Н},$$

где  $F_{\text{п}}$  – сила прижатия, взятая из паспортных данных.

Для компенсации действующих на присоску сил отрыва окончательно примем для дальнейших расчетов силу прижатия  $F = \max(F_{\text{отр}}; F_{\text{пасп}}) = \max(66 \text{ Н}; 93,75 \text{ Н}) = 93,75 \text{ Н}$ .

Среднее требуемое разрежение в присоске составит:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta p \cdot S \Rightarrow \Delta p = \frac{F}{0,375\pi \cdot d^2} \approx 65 \text{ кПа},$$

где  $d = 0,035$  м – диаметр выбранной присоски.

3. Также определим возможную максимальную силу прижатия  $F$  для максимального разрежения. (Минимальная сила прижатия  $F_{\text{min}} = 0$  при  $\Delta p_{\text{min}} = 0$  соответствует случаю, когда присоска совсем не прикреплена к поверхности.)

Максимальное разрежение достигается при полном прикреплении присоски к поверхности и определяется выражением:

$$\Delta p_{\text{max}} = 1,5\Delta p = 97,5 \approx 100 \text{ кПа}.$$

Тогда

$$F_{\text{max}} = 0,375\pi \cdot d^2 \cdot \Delta p_{\text{max}} = 0,375 \cdot 3,14 \cdot 0,035^2 \cdot 100000 = 144 \text{ Н}.$$

В соответствии с приведенными расчетами был выбран датчик вакуумметрического давления *Freescale MPX2202* [10] с пределами измерений до 100 кПа.

Проведенные расчеты показывают, что данные присоски позволяют надежно фиксировать на вертикальной поверхности ШРВП с грузом в тех случаях, когда их общая масса не превышает 5 кг.

**Выбор и программирование нечеткого регулятора.** В рассматриваемом решении ШРВП представляет собой мобильное средство транспортировки полезной нагрузки в пространстве путем передвижения по вертикальным и наклонным поверхностям. Среда перемещения робота является недетерминированной – априори неизвестны коэффициенты трения рабочих поверхностей, наличие на них трещин и дефектов, влажность поверхностей и пр. Также не известны в полной мере и их геометрические параметры, условия перехода робота с одной поверхности на другую и т.п. Решение такой задачи методами классической теории управления весьма затруднительно. Это и привело в конечном итоге к тому, что для роботов рассматриваемого типа обычно используют дистанционное ручное управление. В данной статье предлагается рассмотреть реализацию режима полуавтоматического управления, при котором ряд транспортных операций в отношении корпуса и опор робота может быть автоматизирован. Для этого предлагается при реализации *контроллера блока управления* использовать принципы нечеткой логики.

Для конкретности рассмотрения ограничимся решением задачи перехода ШРВП на сопряженную поверхность. Для этого необходимо:

- 1) выполнить поворот опоры робота так, чтобы обеспечить перпендикулярность стойки его опоры и поверхности стены независимо от их исходного взаимного положения;
- 2) регулировать силу прижатия присосок в зависимости от уровня вакуума в них, в том числе в случаях непредсказуемого изменения давления (например, при попадании присоски на трещину в стене или значительную по высоте выпуклость).

При построении контроллера блока управления использовался алгоритм Мамдани [12]. Рассмотрим решение этих задач с помощью описываемого ниже алгоритма.

Для решения *первой задачи* – поворота опоры робота на заранее неизвестный угол – сформируем две группы лингвистических переменных: входные (рис. 5а) и выходные (рис. 5б).

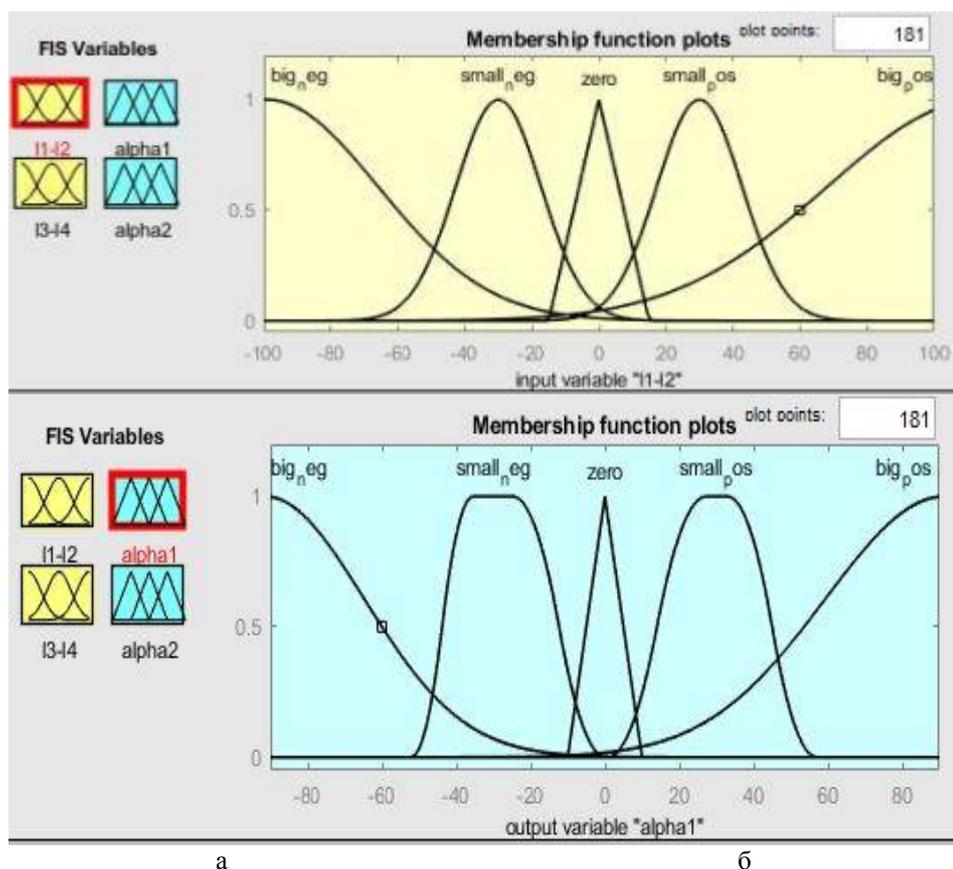


Рисунок 5 – Функции принадлежности лингвистических переменных в первой задаче: а – входных, б – выходных

Входными назначим значения разностей расстояний, измеренных дальномерами, расположенными на противоположных сторонах обода опоры – таким образом, будет определяться угол наклона подошвы опоры относительно рабочей поверхности. Проведем фаззификацию – зададим этим переменным следующие значения: «положительное большое», «положительное малое», «около нуля», «отрицательное малое», «отрицательное большое». Такие же значения зададим и выходным лингвистическим переменным: углам поворота приводов обеих осей в опоре ШРВП.

Диапазоны численных значений выберем, исходя из логики работы и используемых дальномеров ШРВП: для детектирования рабочей поверхности достаточно знать о ее наличии за 100 мм, углы поворота приводов могут изменяться в диапазоне  $\pm 90^\circ$ . Выбор формы графиков функций принадлежности лингвистических переменных обусловлен стремлением получить в результате моделирования по возможности гладкую функцию зависимости входных параметров от выходных.

Определим нечеткие правила:

1. Если (I1–I2) «около нуля», то alpha1 «около нуля».
2. Если (I1–I2) «большое положительное», то alpha1 «большое положительное».
3. Если (I1–I2) «малое положительное», то alpha1 «малое положительное».
4. Если (I1–I2) «малое отрицательное», то alpha1 «малое отрицательное».
5. Если (I1–I2) «большое отрицательное», то alpha1 «большое отрицательное».
6. Если (I3–I4) «около нуля», то alpha2 «около нуля».
7. Если (I3–I4) «большое положительное», то alpha2 «большое положительное».
8. Если (I3–I4) «малое положительное», то alpha2 «малое положительное».
9. Если (I3–I4) «малое отрицательное», то alpha2 «малое отрицательное».
10. Если (I3–I4) «большое отрицательное», то alpha2 «большое отрицательное».

При дефаззификации анализируем центры масс получившихся фигур. Результатом моделирования нечеткого вывода является трехмерная функция (поверхность), сформированная входными лингвистическими переменными и каждой из выходных (см. пример на рис. 6).

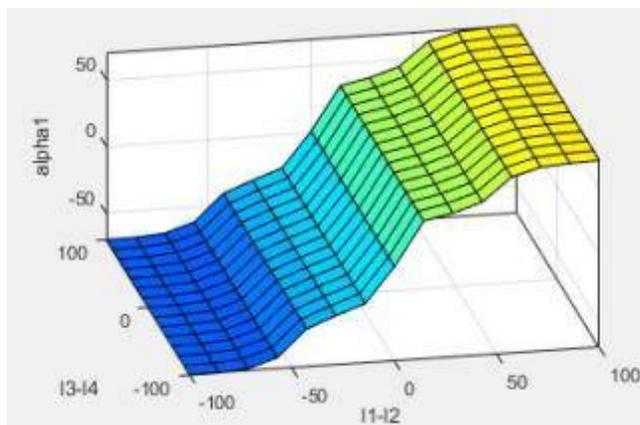


Рисунок 6 – Пример результата нечеткого вывода

Видно, что получившаяся функция достаточно гладкая, она не имеет экстремумов и разрывов, что соответствует логике работы ШРВП.

Например, в случае, когда оба дальномера показывают с некоторой погрешностью величину в 100 мм, требуемый угол поворота привода будет равен  $0^\circ$ , поскольку равенство показаний соответствующих дальномеров означает параллельность подошвы опоры рабочей поверхности.

Для решения *второй задачи* (регулирования силы прижатия опоры) входными переменными назначим показания, полученные с вакуумметров, которым также присвоим значения «большое», «среднее» и «малое». Выходными лингвистическими переменными назначим значения требуемой силы прижатия для каждой из опор.

Численные значения границ диапазонов были выбраны, исходя из вышеприведенных расчетов. Функции принадлежности лингвистических переменных приведены на рисунке 7.

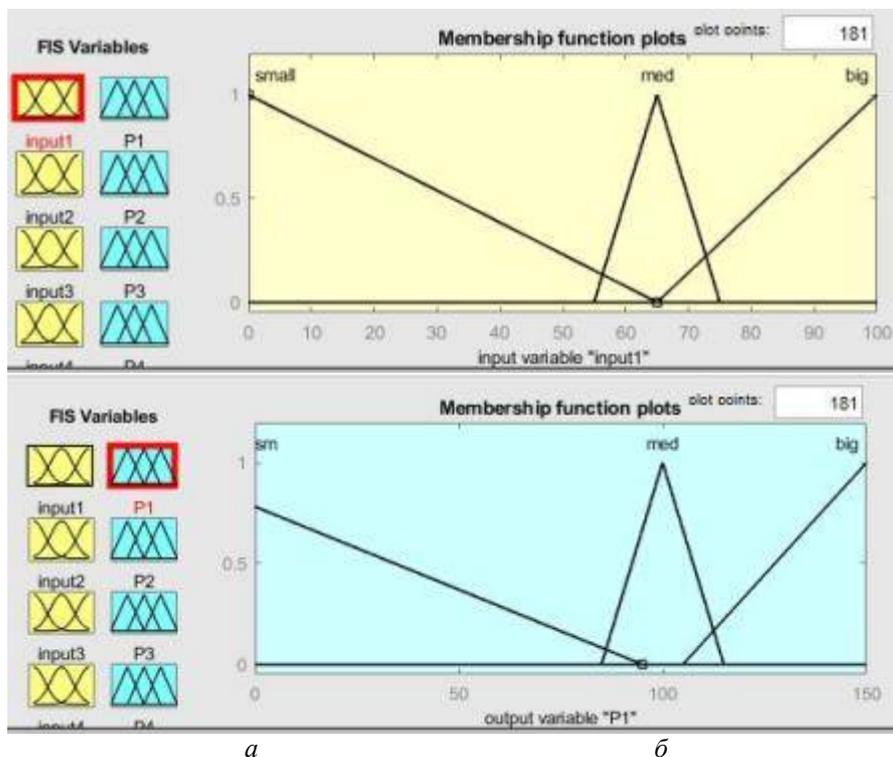


Рисунок 7 – Функции принадлежности лингвистических переменных во второй задаче: *а* – входных; *б* – выходных

Так же, как и ранее, определим нечеткие правила для этой задачи:

1. Если «вход1» «малое», то P1 «большое», P2 «среднее», P3 «среднее», P4 «среднее».
2. Если «вход2» «малое», то P2 «большое», P1 «среднее», P3 «среднее», P4 «среднее».
3. Если «вход3» «малое», то P3 «большое», P2 «среднее», P1 «среднее», P4 «среднее».
4. Если «вход4» «малое», то P4 «большое», P2 «среднее», P3 «среднее», P1 «среднее».
5. Если «вход1» «среднее» и «вход2» «среднее» и «вход3» «среднее» и «вход4» «среднее», то P1 «среднее», P2 «среднее», P3 «среднее», P4 «среднее».
6. Если «вход1» «малое» и «вход2» «малое», и «вход3» «малое», и «вход4» «малое», то P1 «большое», P2 «большое», P3 «большое», P4 «большое».
7. Если «вход1» «большое» и «вход2» «большое», и «вход3» «большое», и «вход4» «большое», то P1 «среднее», P2 «среднее», P3 «среднее», P4 «среднее».

Результаты нечеткого вывода приведены на рисунке 8, где слева показана зависимость силы прижатия присоски к поверхности от разрежения в ней же. Справа показано, что сила прижатия каждой присоски не зависит от разрежения в остальных.

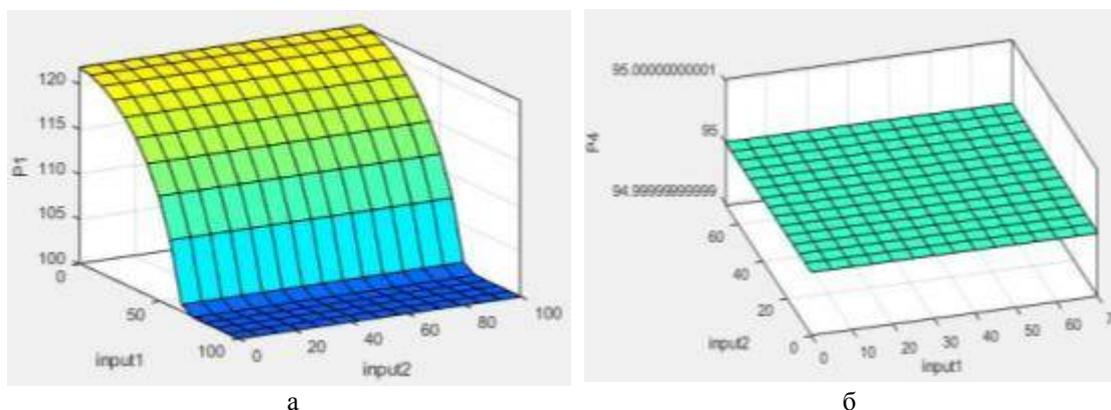


Рисунок 8 – Результаты нечеткого вывода. Зависимость силы прижатия присоски от разрежения: а – в ней же; б – в другой присоске

В качестве примера возьмем точку на полученной поверхности: в случае, когда разрежение (вакуумметрическое давление) в присоске составляет 50 кПа (на 15 кПа меньше требуемого), необходимая сила прижатия, полученная от контроллера, составляет приблизительно 110 Н при среднем значении в 93,75 Н.

**Разработка алгоритма управления автономным движением ШРВП.** Полученные выше результаты позволяют разработать алгоритм движения ШРВП в полуавтоматическом режиме.

Рассмотрим подробнее алгоритм обследования стен в замкнутом помещении. На рисунке 9 этот алгоритм показан в виде сети Петри [6]. Робот циклически обследует все стены помещения по периметру и после завершения цикла переходит на следующий уровень вверх или вниз по стене.

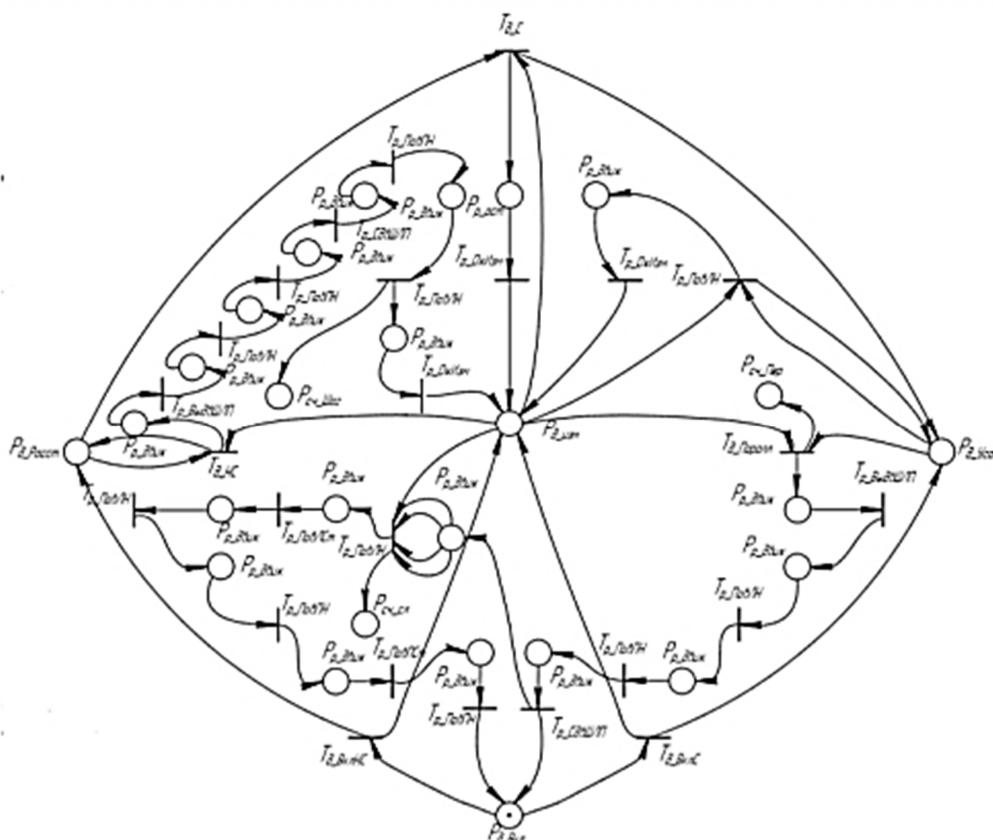


Рисунок 9 – Алгоритм обхода стен помещения в автоматическом режиме

Здесь состояниями являются состояния звеньев робота (движение, остановка), показания датчиков расстояния (далее «датчиков») и счетчики пройденных шагов, совершенных переходов на стену и пройденных периметров стены; переходами – включение датчиков и перемещение робота; фишками – текущая ситуация. Ниже представлен алфавит данной сети.

Состояния: Рд\_вкл – датчик включается; Рд\_изм – датчик проводит измерения; Рд\_расст – датчик измеряет расстояние до стены; Рд\_угол – датчик измеряет угол между опорой и стеной; Рр\_движ – робот совершает движение; Рр\_ост – робот останавливается; Рсч\_пер – счетчик подсчитывает количество совершенных переходов на стену для отслеживания пройденного периметра стены; Рсч\_сл – счетчик подсчитывает количество пройденных «слоев» стены для оценки текущего прогресса в обследовании данного помещения; Рсч\_шаг – счетчик подсчитывает количество совершенных шагов ШРВП для оценки общего пройденного расстояния.

Переходы: Тд\_вклнс – после включения датчика стена не найдена; Тд\_вклс – после включения датчика найдена стена; Тд\_нс – датчик не обнаружил стену; Тд\_паралл – стена находится параллельно опоре робота; Тд\_с – датчик обнаружил стену; Тр\_выдвшлип – робот выдвигает шарнир линейного перемещения; Тр\_ожизм – робот ожидает измерения от датчика; Тр\_повлн – робот поворачивает левую опору; Тр\_повпрн – робот поворачивает правую опору; Тр\_сдвшлип – робот сдвигает шарнир линейного перемещения.

Представленный в виде сети Петри алгоритм можно пояснить следующим образом: порядок движения ШРВП зависит от данных, поступающих с дальномеров. В случае, если перед роботом, движущимся по рабочей поверхности, обнаруживается смежная стена, он совершает переход на нее; иначе – делается шаг вперед. Когда пройдены все четыре стены, периметр замыкается и осуществляется переход на следующий уровень высоты стены.

Анализ алгоритма показывает, что без учета (использования) счетчиков данная сеть Петри: а – не является безопасной (число фишек в состоянии может превышать 1); б – не является консервативной (сумма фишек во всех состояниях не остается постоянной); в – является ограниченной (позиции не могут накапливать бесконечное число фишек); г – является активной. Данные свойства подтверждают ее логичность и возможность использования при управлении ШРВП.

**Заключение.** В статье представлена кинематическая модель ШРВП, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана, и показана возможность его применения для транспортировки диагностического оборудования с целью обследования внутренних стен помещений в условиях нормального атмосферного давления. Приведен расчет кинематических параметров робота, в результате которого стало возможным определить положение его опор в любой момент времени. Определены элементы системы создания разрежения в вакуумных захватах и построен нечеткий регулятор, управляющий силой прижатия опор к поверхности стены. Для этой системы выбраны необходимые датчики и присоски, определено их расположение на опоре ШРВП.

Разработана система управления движением робота по частично недетерминированной поверхности в полуавтоматическом режиме за счет использования средств нечеткой логики. Также предложен алгоритм автоматического обхода внутренних поверхностей стен зданий, представленный сетью Петри. Проведен анализ полученных алгоритмов, показывающий их логичность и возможность реального применения в системе управления ШРВП.

Предложенный в статье подход к построению системы управления ШРВП позволяет упростить трудоемкий ручной процесс обследования стен помещений, доведя его до полуавтоматической процедуры, и повысить скорость его выполнения. При этом диагностические данные соотносятся с конкретным положением робота на стене и сохраняются в виде соответствующего документа (протокола обследования).

Робот имеет возможность движения по наклонным поверхностям, а также перехода между поверхностями. Полезная нагрузка на борт ШРВП может достигать 2 кг при сохранении устойчивости его движения.

#### **Библиографический список**

1. Антонов А. В. Система управления трехопорным колесно-шагающим роботом / А. В. Антонов, С. А. Воротников, Н. А. Выборнов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2 (34). – С. 58–69.
2. Воротников С. А. Дистанционное управление адаптивными роботами / С. А. Воротников, Б. Б. Михайлов, А. С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12.
3. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем / С. А. Воротников. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 384 с.
4. Градецкий В. Г. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин, Л. Н. Кравчук. – Москва : Наука, 2001. – 369 с.
5. Зенкевич С. Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : учеб. для вузов / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
6. Иванов В. А. Математические основы теории оптимального и логического управления : учебное пособие / В. А. Иванов, В. С. Медведев. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 600 с.
7. Компактные ультразвуковые датчики Microsonic серии nano. – Режим доступа: [https://kipservis.ru/datchiki\\_microsonic/datchiki\\_nano.htm](https://kipservis.ru/datchiki_microsonic/datchiki_nano.htm), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.06.2019).
8. Малыхин А. Ю. Имитационная модель системы удержания робота вертикального перемещения с вакуумными захватами / А. Ю. Малыхин, С. В. Калинин, А. А. Тачков, А. Г. Волков // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 281–286.
9. НТЦ Эксперт – Методы неразрушающего контроля. – Режим доступа: <http://www.ntcexpert.ru/85-acenter/953-metody-nerazrushayushchegokontrolya>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.06.2019).
10. Ющенко А. С. Методы нечеткой логики в управлении мобильным манипуляционным роботом / А. С. Ющенко // Инженерный журнал: наука и инновации. – № 6 (6). – С. 23.
11. Freescale MPX2202 Series. – Режим доступа: <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MPX2202.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 01.06.2019).
12. Kaur A. Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System / A. Kaur // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE). – May 2012. – Vol. 2, iss. 2.
13. Kolhalkar N. R. Wall Climbing Robots: A Review / N. R. Kolhalkar, S. M. Patil // Int. Journal of Engineering and Innovative Technology. – 2012. – Vol. 1, iss. 5. – P. 227–229.
14. Schmalz PFYN 35 FPM-65 G1/8-AG. – Режим доступа: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-suction-cups/flat-suction-cups-round/flat-suction-cups-rfyn/10.01.01.00187>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 01.06.2019).
15. Schmidt D. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures – A survey of design aspects and technologies / D. Schmidt, K. Berns // Robotics and Autonomous System. – 2013. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.002>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 05.04.2019).

## References

1. Antonov A. V., Vorotnikov S. A., Vybornov N. A. Sistema upravleniya trekhopyornym kolesno-shagayushchim robotom [Three-wheeled walking robot control system]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 2 (34), pp. 58–69.
2. Vorotnikov S. A., Mikhaylov B. B., Yushchenko A. S. Distantionnoye upravleniye adaptivnymi robotami [Adaptive robot remote control]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation and Control], 2005, no. 12.
3. Vorotnikov S. A. *Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh sistem* [Robotic systems information tools]. Moscow, BMSTU Publ., 2004. 384 p.
4. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. *Upravlyaemoe dvizhenie mobilnykh robotov po proizvolno orientirovannym v prostranstve poverkhnostyam* [Controlled unspecified oriented movement of mobile robots]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 369 p.
5. Zenkevitch S. L., Yushchenko A. S. *Upravleniye robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami : uchebnik dlya vuzov* [Robot control. Basic principles of mobile robots control: college textbook]. Moscow, BMSTU Publ., 2004. 480 p.
6. Ivanov V. A., Medvedev V. S. *Matematicheskiye osnovy teorii optimalnogo i logicheskogo upravleniya* [Mathematic principles of optimized and logic control theory]. Moscow, BMSTU Publ., 2004. 480 p.
7. *Kompaktnye ultazvukovye datchiki Microsonic serii nano* [Compacted ultrasonic sensors Microsonic nano-series]. Available at: [https://kipservis.ru/datchiki\\_microsonic/datchiki\\_nano.htm](https://kipservis.ru/datchiki_microsonic/datchiki_nano.htm) (accessed 01.06.2019).
8. Malykhin A. Yu., Kalinichenko S. V., Tachkov A. A., Volkov A. G. Imitatsionnaya model sistemy uderzhaniya robota vertikalnogo peremeshcheniya s vakuumnymi zakhvatami [Simulation model of a vertical robot holding system with vacuum grips]. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robot Technics], 2016, vol. 1, no. 1, pp. 281–286.
9. *NTC Ekspert – Metody nerazrushayushchego kontrolya* [STC Expert – nondestructive testing]. Available at: <http://www.ntcexpert.ru/85-acenter/953-metody-nerazrushayushchego-kontrolya> (accessed 01.06.2019).
10. Yushchenko A. S. Metody nechetkoy logiki v upravlenii mobilnym manipulyatsionnym robotom [Fuzzy logic methods in control of mobile manipulative robot]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], no. 6 (6), p. 23.
11. *Freescale MPX2202 Series*. Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX2202.pdf> (accessed 01.06.2019).
12. Kaur A. Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, May 2012, vol. 2, iss. 2.
13. Kolhalkar N. R., Patil S. M. Wall Climbing Robots: A Review. *Int. Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2012, vol. 1, iss. 5, pp. 227–229.
14. *Schmalz PFYN 35 FPM-65 G1/8-AG*. Available at: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-suction-cups/flat-suction-cups-round/flat-suction-cups-pfyn/10.01.01.00187> (accessed 01.06.2019).
15. Schmidt D., Berns K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures – A survey of design aspects and technologies. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.002> (accessed 05.04.2019).